

Análisis del Opus Caementicium del Teatro Greco de Villa Adriana, Tívoli (Roma)

/ESTHER ONTIVEROS ORTEGA (1), SARA DIAZ RAMOS (2), RAFAEL HIDALGO PRIETO (2)

(1) Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, Avenida de los Descubrimientos Isla de la Cartuja s/n 41092. (Sevilla)

(2) Universidad Pablo de Olavide 41013 Sevilla (España)

INTRODUCCIÓN

Villa Adriana fue residencia y sede del gobierno del emperador romano Adriano entre 117-138 d.C. Se localiza en Tívoli a 20 Km de Roma (Italia) (Fig. 1).

El edificio está construido por una argamasa del tipo opus caementicium, que corresponde a la fábrica interior de muro, revestida por un muro cortina de tufo o toba volcánica.



Fig. 1. Teatro Greco de Villa Adriana, Tívoli (Roma).

Para la construcción los romanos utilizaban materiales próximos al edificio e incluso de la propia cimentación. Estaba constituido por agregados (harenae fossiae), de tamaño grava -tufo-, cal grasa o magra, ceniza volcánica -pozolanas- (caementa) y agua (Oleson 1988). Su proporción según Vitruvio era 1:2 (cal/puzolana) y entre 15-20% de agua.

El aditivo puzolánico daba carácter hidráulico a los morteros (Moore, 1995), aportando gran resistencia y durabilidad a estas fábricas constructivas (Jackson, 2004).

El Teatro Greco de Villa Adriana se encuentra emplazado en una zona geológica donde afloran el Tufo Lionato y las puzolanas (Formación Puzzolane Nere). Ambos materiales fueron utilizados

para su construcción. La cal procedía de la calcinación de travertinos que afloran en las proximidades de Tívoli (Italia).

El Tufo Lionato y las Puzzolane Nere corresponden a materiales relacionados con la actividad volcánica que se inicia en la región del Lazio (zona central de Italia) hace 0.6 millones de años. El Tufo Lionato es material piroclástico procedente del volcán Albano (Colli Albani, Alban Hills) (de Rita & Zarlenga, 2001 y Sappa et al, 1995). Las Puzzolane Nere es una ignimbrita rica en leucita (alterada a analcima), clinopiroxenos y micas.

El Tufo Lionato conocido como Aniense por su relación con las canteras de Saloni (Vía Tiberina), ha sido utilizado ampliamente en época romana como material de construcción en esta región de Italia (Jackson et al., 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se han tomado 40 muestras localizadas en distintos puntos del Teatro (muro galería anular, muro del Post-scaemium, frente Escénico, cávea, muro de exedras y ninfeo).

Simultáneamente se han analizado los afloramientos de Puzzolane Nere y Tufo Lionato, cercanos a Villa Adriana.

Las técnicas utilizadas para el análisis de las muestras han sido difracción de rayos X (equipo Philip PW-1710 con rendija automática), microscopía óptica de polarización (MOP. equipo Leica DMLP, con captura digital de imagen Leica DFC 280), SEM-EDX (equipo Jeol 5400X) y fluorescencia de rayos X (equipo PANalitical, Axios).

Además se han determinado granulometría, porosidad y densidad de los materiales muestreados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La composición mineralógica media de la Puzzolane Nere se muestra en la Fig. 2.

Presentan alta proporción de filosilicatos y esmectitas con contenidos importantes en chabasita, leucita, analcima calcita, phillipsita, piroxeno y trazas de olivino y cuarzo.

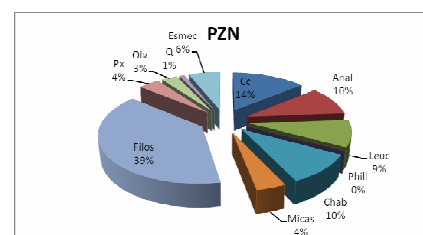


Fig. 2. Composición mineralógica de las Puzzolane Nere.

El opus caementicium muestra un incremento importante en calcita, por efecto de la adición de cal, y menor contenido en filosilicatos y esmectitas, que se explica por su reacción con la cal para formar silicatos cálcicos (tobermorita, gehlenita y esträtlingita).

La gehlenita aparece en morteros hidráulicos naturales (Gadermayr et al., 2012) y la esträtlingita es un aluminosilicato que aporta altas resistencias a los morteros de cemento, y ha sido anteriormente detectado en morteros romanos (Sersale & Orsini, 1969).

La presencia de portlandita, observada al SEM en el interior de un nódulo de cal (Fig. 3), indica que la carbonatación no ha concluido y que continúa al detectarse fases carbonatadas de aragonito.

El tamaño de grano es variable, su granulometría (Fig. 4.) muestra un C_u

(coeficiente de uniformidad) con un rango de variación por encima de 14, por lo que pueden considerarse como agregados bien graduados.

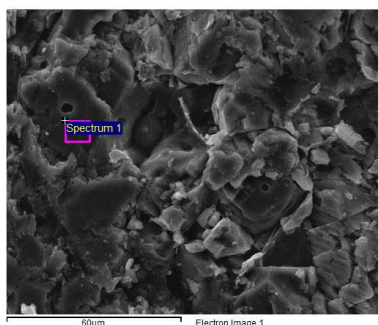


Fig. 3. Cristales de portlandita en un nódulo de cal al SEM-EDX.

El estudio petrográfico indica la cal y las puzolanas como componentes principales de los morteros, y de forma esporádica tufo y travertino.

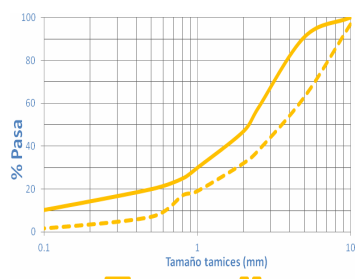


Fig. 4. Granulometría de opus caementicium.

La reacción cal-puzolana (Fig. 5) se manifiesta con la formación de un halo de reacción alrededor de los granos de puzolana pero fundamentalmente por la presencia de zonas en la pasta que no se tiñen con alizarina.

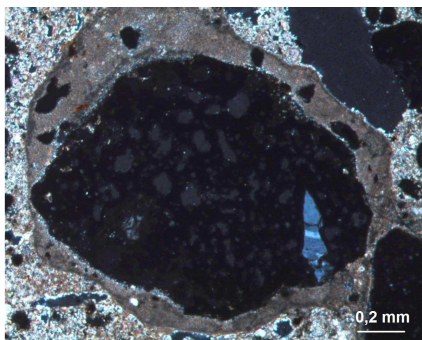


Fig. 5. Halo de reacción entre el partícula de puzolana y la cal. MOP, nicoles cruzados.

Se trata de morteros compactos pero muy porosos (40% de porosidad mediante ensayo de absorción al agua) con una densidad de 2.76 g/cm³ con una aportación de cal al muro de toba volcánica en torno al 20 %.

La composición química de las puzolanas (Fig.6) muestra altos contenidos en SiO₂ (40%), que junto a Al₂O₃ y Fe₂O₃ superan el 70 %, por lo que cumplen los requerimientos exigidos por la norma ASTM C618-00. Gran parte del contenido en CaO junto con K₂O se atribuye a la presencia de analcima y leucita.

Se ha determinado el índice de hidraulicidad y módulo hidráulico (Callebaut, et al., 2001). Los valores que presentan estos morteros están comprendidos entre 0,9 y 1,1 lo que indica un carácter hidráulico propio de cementos naturales (Strydonck et al., 1986). Se pone de manifiesto por el alto contenido en puzolanas reactiva de pequeño tamaño (< 5µm).

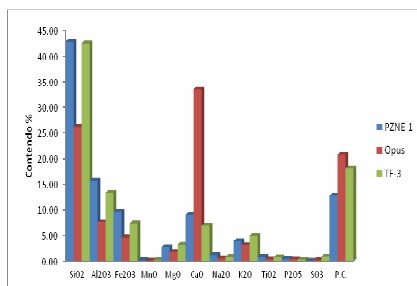


Fig.6. Composición química de las Puzolane Nere, Tufo Lionato y opus caementicium.

La reacción puzolánica tiene lugar en la interfase cal-puzolana, y se ha podido estudiar a través del SEM-EDX, como varía la relación Ca/Si (Callebaut, et al., 2001) en las pastas. En estos morteros se observa un enriquecimiento de Ca hacia los bordes de grano (Fig. 7), aunque las reacciones más importante tienen lugar en la matriz rica en puzolana más finas, donde es frecuente el desarrollo de silicatos y aluminatos cálcicos (Si, Al y Ca). La cal no reactiva se observa creciendo en los poros o formando nódulos de cal.

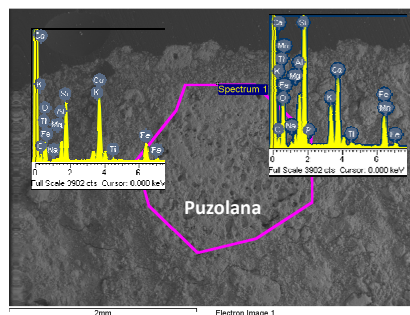


Fig. 7. Variaciones en la relación Ca/Si en la zona de contacto puzolana cal al SEM-EDX.

La reacción puzolánica implica consumo de Ca(OH)₂. Al inicio de la hidratación,

alrededor del agregado, se forma una fina película de agua con una alta proporción agua/cal. Parte del agua es retenida por las puzolanas reduciendo en la zona de contacto la formación de microfisuras y favoreciendo la adherencia pasta-grano. Esto explica gran parte de las buenas cualidades de estos materiales.

REFERENCIAS

- ASTM C618-00. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.
- Callebaut, K., Elsen, J.; Van Balen, K., Viaene, W., (2001): Nineteenth century hydraulic restoration mortar in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium). *Natural hydraulic lime or cement?*. *Cement and Concrete*. **31**, 397-403.
- de Rita, D. & Zarlinga, F. (2001): *Middle Pleistocene geology of the Bassa Campagna Romana. The World of Elephants. International Congress, Rome 2001*. Pp: 38-42.
- Gardemayer, N., Pinter F., Weber, J. (2012): *Identification of 19 th century roman cements by the phase composition of clinker residues in historic mortars. 12 th International Congress on the Deterioration and Conservation Stone*. New York.
- Jackson, M (2004): *Denver Annual Meeting. Geological Society of America*, **36(5)**, p. 308.
- Jackson, M., Ciancio Rossetto P., Kosso CK., Buonfiglio, M., Marra, F (2011). *Building materials of the theatre of Marcellus, Rome. Archaeometry* **53**, 4 728-742.
- Moore, D. (1995) *PE The Roman Pantheon: The Triumph of Concrete*. University of Guam Station. 239 pp.
- Oleson, J.P., (1988). *The technology of Roman Harbours*, *IJNA* **17**, 147-158.
- Sappa, G., Giglio, G., de Casas, G. (1995). "Mechanical characteristics of stone volcanic tufts used in the building of ancient Rome. *Mat Rest Soc Symp Proc Vol 352*. Materials Research. Society.
- Sersale, R. & Orsini, P.G. (1969). *Hydrated phases after reaction of lime with pozzolanic materials or with blast furnace slag. Proceedings of the 5th Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, IV-7, 114-121*.
- Strydonck, V., Dupas, M., Dauchot, M., Dehon, C., Pachiaudi M., Marechal, J. (1986). *The influence of contamination (fossil) carbonate and the variation of δ13C in mortar dating. In M. Stuiver-WH Waldren. Precedding of the 12 th International 14C Conference. Radiocarbon* **28**. 702-710.
- Roy, D.M. & Langton, C.A. (1989). *Studies of ancient concrete as analogs of cementitious sealing materials for a repository in tuff. Report LA-11527-MS, UC-721, prepared by the Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, for Los Alamos National Laboratory, New Mexico*.